

О РАЗРАБОТКЕ И ПРИМЕНЕНИИ КОНЦЕНТРАТОРОВ МАГНИТНОГО ПОТОКА ДЛЯ УСТРОЙСТВ МИКРОМАГНИТОЭЛЕКТРОНИКИ

Представлены результаты исследований по разработке, изготовлению и использованию первичных концентраторов магнитного потока при измерении слабых магнитных полей, в том числе в космическом приборостроении для применения в малых космических аппаратах. Использование явления концентрации магнитного потока ферромагнитными устройствами позволяет разработать сенсоры для измерения слабых магнитных полей, обладающие высокой магнитной чувствительностью, которая превышает среднестатистическую величину для обычного элемента Холла на 2–3 порядка, причем без ухудшения шумовых характеристик и временной стабильности. Рассмотрены объемные осесимметричные и плоские концентраторы магнитного потока. Приведена схема расположения и основные технические характеристики первичных векторных (трехкомпонентных) высокочувствительных преобразователей магнитной индукции в макетных (опытных) образцах.

Ключевые слова: концентраторы; магнитный поток; магнитные поля; космическое приборостроение.

This paper presents the results of research into the development, manufacture, and use of primary magnetic flux concentrators in measurements of weak magnetic fields, including spacecraft instrumentation for the use in small spacecrafts. Owing to the phenomenon of magnetic flux concentration by ferromagnetic devices, the sensors for measuring weak magnetic fields with high magnetic sensitivity exceeding the statistical value for the conventional Hall-effect transducer by 2–3 times, and without degradation of noise characteristics and temporal stability may be developed. Three-dimensional axis-symmetric and two-dimensional magnetic flux concentrators are considered. The layout and main specifications of the primary vector (ternary) highly-sensitive converters of magnetic induction in prototypes are demonstrated.

Key words: concentrators; magnetic flux; magnetic fields; space instrumentation.

В современной микромагнитоэлектронике все чаще применяются концентраторы магнитного потока [1], особенно в случае микроминиатюризации сенсорных приборов и датчиков.

Использование явления концентрации магнитного потока ферромагнитными устройствами определенных геометрических форм позволяет разработать сенсоры для измерения слабых магнитных полей, обладающие высокой магнитной чувствительностью, которая превышает среднестатистическую величину для обычного элемента Холла на 2–3 порядка, причем без ухудшения шумовых характеристик и временной стабильности. Ферромагнитные концентраторы магнитного потока в большинстве случаев имеют осесимметричную протяженную форму с узким зазором под элемент Холла, а также могут быть

созданы в плоскостной форме. Для снижения проявлений магнитного гистерезиса в сенсорах при их использовании в области слабых квазистатических магнитных полей обычно применяются размагничивающие витки, подключенные к источнику тока, гальванически развязанному с питанием элемента Холла.

Задача выбора материала концентратора, его размеров и величины зазора остается актуальной и в настоящее время. Сложность создания микроэлектронных сенсоров квазистатических магнитных полей с ферромагнитными концентраторами состоит в значительном падении коэффициента усиления магнитного потока $K_Y = \mathbf{B} / \mathbf{B}_0$ при уменьшении геометрической длины концентраторов (\mathbf{B}_0 – индукция внешнего магнитного поля; \mathbf{B} – индукция магнитного поля в зазоре, где установлен элемент Холла). Для получения высоких значений K_Y в сочетании с миниатюризацией необходимо оптимизировать геометрические размеры концентраторов, их форму, зазор и свойства используемого материала.

Решение проблем такой оптимизации наиболее целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования и расчетов. Для этого разработана компьютерная модель функционирования сенсора слабых квазистатических магнитных полей, состоящая из классического элемента Холла, расположенного в зазоре осесимметричных ферромагнитных концентраторов.

Осесимметричные концентраторы магнитного потока

Осесимметричность концентраторов превращает задачу по расчету индукции магнитного поля в двумерную. С помощью программы femm 4.2 [2] решалось уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала \mathbf{A} , где $\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$. Для полного определения функции \mathbf{A} использовалось условие $\text{div}\mathbf{A} = 0$, которое представляет собой калибровку Кулона. Уравнение, характеризующее магнитные свойства материалов конструкции, записывалось в виде $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} + \mathbf{B}_r$, где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля; μ – магнитная проницаемость вещества, являющаяся функцией $|\mathbf{B}|$, т. е. $1/\mu = f(|\mathbf{B}|)$, что выражает нелинейную связь между полями \mathbf{B} и \mathbf{H} вследствие насыщения магнитного потока, особенно в месте его сужения.

Для этой модели граничные условия выражались через векторный потенциал. Тангенциальная составляющая $\mathbf{A} = 0$ на границе достаточно удаленной, чтобы магнитную энергию можно было принять равной нулю. На ось симметрии вращения накладывалось условие $\mathbf{A} = 0$, а в плоскостях магнитной и геометрической симметрии $d\mathbf{A}/dn = 0$, т. е. линии магнитного потока перпендикулярны этим плоскостям. Область расчета магнитного поля выбиралась как минимум на два порядка больше характерных размеров (длин) концентратора. Она разбивалась на конечные элементы задаваемых размеров. Как правило, конечные элементы, используемые для дискретизации рассматриваемой области, имели вид треугольников различной величины, причем размеры увеличивались при приближении к границам модели в бесконечности. Общее количество точек, в которых осуществлялся расчет, составляло не менее 50 тыс. Дискретизация выполнялась автоматически, постпроцессор решал таким образом систему линейных алгебраических уравнений, пока их сходимость не уменьшалась до 10^{-8} .

Для поддержания постоянного квазиоднородного магнитного поля при расчете использовалась осесимметричная двумерная модель соленоида длиной 760 мм. Индукция магнитного поля внутри соленоида \mathbf{B}_0 задавалась величиной тока обмотки. В отсутствие ферромагнитного концентратора неравномерность \mathbf{B}_0 в пределах длины 200 мм средней части соленоида по его оси не превышала 3,5 %, а вдоль радиуса – 2 %.

В [3] показано, что в области слабых магнитных полей при длине каждого концентратора магнитного потока $L = 100$ мм обеспечивается максимальный $K_Y = 404$, а при $L = 30$ мм коэффициент усиления равен 177 при угле заострения 20° . Верхний диапазон \mathbf{B}_{\max} ограничен индукцией насыщения материала, и для стали 1117 он не превышает 5,5 мТл, а для ферритов – в 3–4 раза меньше.

В новом [4] разработанном сенсоре магнитного поля на эффекте Холла (однокомпонентном) получены более высокие показатели. Сенсор содержит миниатюрный элемент Холла и два осесимметричных концентратора магнитного потока, выполненных из материала с высокой магнитной проницаемостью и низкой коэрцитивной силой. Концентраторы изготовлены в форме цилиндрических стержней с заостренными концами в виде усеченных конусов, направленных меньшими основаниями навстречу друг другу и разнесенных на минимальное расстояние, равное толщине элемента Холла. Угол между образующей усеченного конуса и его осью выбран в диапазоне $17,5\text{--}22,5^\circ$, а элемент Холла помещен в зазоре концентраторов по оси конусов. Стержни заключены в трубчатый корпус из немагнитного материала, они съемные и содержат N одинаковых секций с элементами крепления к ним. Концентраторы магнитного потока выполнены из материала с высокой индукцией магнитного насыщения $\mathbf{B}_s = 2,8$ Тл (из супермендюра), что позволяет получить при $N = 1$ значение $\mathbf{B}_{\max} \approx 19,1$ мТл.

Микроминиатюрный элемент Холла, созданный на основе гетероэпитаксиальной структуры n-InSb-i-GaAs, содержит подложку из монокристаллического i-GaAs, пленочную магниточувствительную область из n-InSb, измерительное перекрестие в форме квадрата 30×30 мкм и золотые электрические

выводы из микропроволоки, приваренные с помощью микросварки или термокомпрессии. Рабочая поверхность элемента Холла герметизирована слоем компаунда из эластосила, он размещен на меньшем основании конуса, диаметр которого равен или незначительно превосходит длину измерительного перекрестия, а толщина не превышает величину зазора $d = 100$ мкм.

Экспериментальные коэффициенты усиления магнитной индукции в зазоре концентратора при различных значениях длины концентратора для предложенного датчика в сравнении с [2, 3] (расхождение экспериментальных данных с расчетными менее 5 %) приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные коэффициенты усиления магнитной индукции K_Y

L, мм	K_Y	
	[2,3] (Steel 1117)	(супермендюр)
100	404	1006 (при $N = 10$)
80	–	820 (при $N = 8$)
60	–	635 (при $N = 6$)
30	177	355 (при $N = 3$)
10	–	132 (при $N = 1$)

Из табл. 1 следует, что удалось увеличить коэффициент усиления магнитного потока более чем в два раза без изменения длины ферромагнитных концентраторов, а также поднять верхний предел измерения индукции магнитного поля более чем в три раза.

Расчетные значения коэффициентов усиления K_Y при различных значениях углов ω , позволяющих оптимизировать диапазон значений угла ω , при котором выполняются основные требования, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Зависимость K_Y (ω)

ω , град	10	20	30	45	90
K_Y	183–134	177	169	159	84,5

Полученные расчетные данные свидетельствуют о том, что оптимальным является диапазон угла ω , равный ($17,5$ – $22,5^\circ$), это соответствует величине угла при вершине конуса $2\omega = (35$ – $45^\circ)$.

Первичные векторные (трехкомпонентные) высокочувствительные преобразователи магнитной индукции

Схема расположения первичных векторных (трехкомпонентных) высокочувствительных преобразователей магнитной индукции в макетных (опытных) образцах представлена на рис. 1.

Основные технические характеристики опытных образцов:

Величина зазора в концентраторе магнитного потока	$d = (400 \pm 10)$ мкм
Общая длина концентратора магнитного потока	$2L = (30 \pm 0,5)$ мм
Коэффициент усиления магнитного потока, средний	$K_Y = 200$
Размер магниточувствительной области не превышает	$50 \times 50 \times 7$ мкм
Размер элемента Холла	$0,5 \times 0,5$ мм
Магнитная чувствительность элементов Холла при управляющем токе 60 мА	500 мВ/Тл
Концентрация носителей заряда (электронов) n	$1,1 \cdot 10^{17}$ см ⁻³
Подвижность носителей заряда	$2,8$ м ² /В · с
Температурный коэффициент электросопротивления в диапазоне температур (77–300) К	Не более 0,04 % / К
Температурный коэффициент магнитной чувствительности: в диапазоне температур (77–300) К	Не более 0,01 % / К
Коэффициент нелинейности по магнитной индукции	Не более 0,25 %
Остаточное электрическое напряжение	Не более 30 мкВ
Входное (выходное) сопротивление элементов Холла	(10–15) Ом
Число магниточувствительных элементов в преобразователе	3
Угол установки элементов Холла по отношению друг к другу	$(90 \pm 0,5)^\circ$

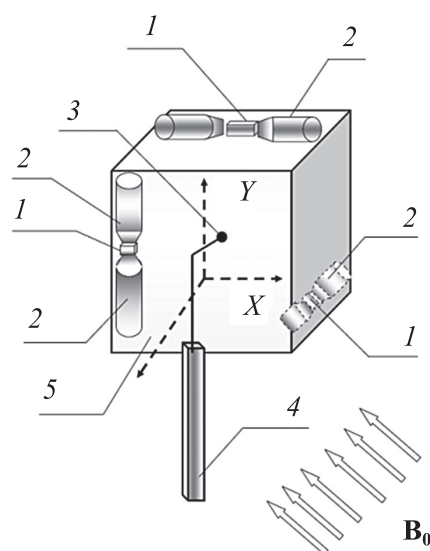


Рис. 1. Схема расположения магниточувствительных элементов Холла с осесимметричными концентраторами магнитного потока:

1 – элемент Холла; 2 – концентратор;
3 – термопара; 4 – держатель; 5 – корпус

Разработанные (рис. 2) сенсоры использовались для проведения измерений вариации магнитного поля Земли, обнаружения гипогеомагнитных зон, в космическом приборостроении для применения в малых космических аппаратах (МКА).

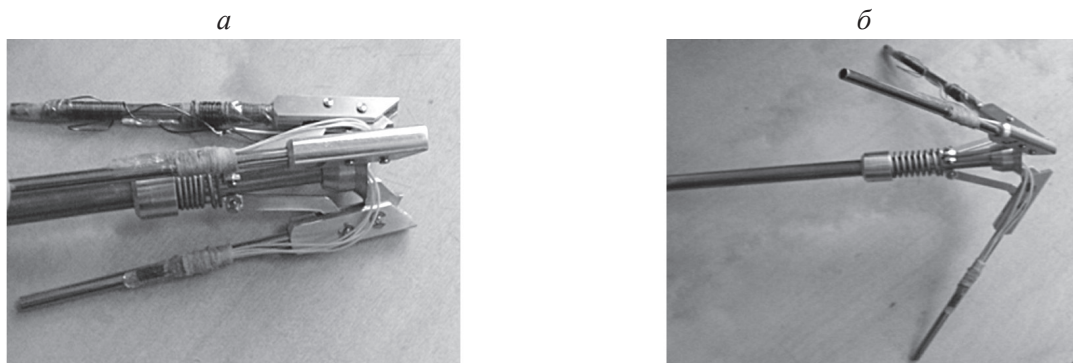


Рис. 2. Трехкоординатные сенсоры слабых магнитных полей на эффекте Холла с концентраторами магнитного потока для применения в МКА:

а – в транспортном сложенном состоянии; *б* – в рабочем состоянии

Основные технические характеристики первичных преобразователей магнитного поля для МКА

Диапазон измеряемых индукций	0 ... 250 000 нТл;
Диапазон рабочих температур	–150 ... + 100 °С;
Разрешающая способность, не менее	1 нТл;
Диапазон рабочих частот	0 ... 20 (100) кГц;
Двухканальное исполнение каждого канала магнитометра	

Первичные преобразователи магнитной индукции вынесены за пределы корпуса МКА на расстоя-

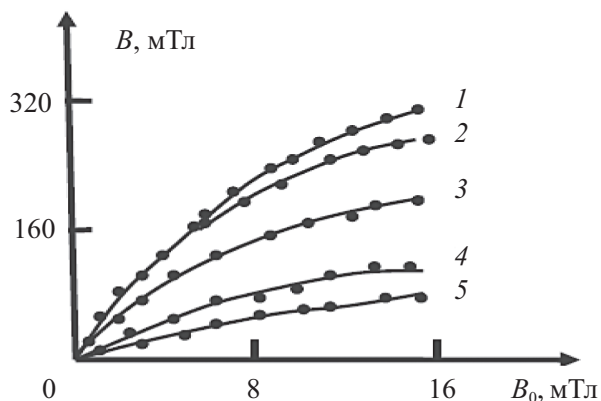


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $B(B_0)$ для плоских концентраторов магнитного потока:
1, 2 – сталь 3415, толщина 0,35 мм, ширина $b = 40$ мм, длина $L = 40$ мм, зазор $d = 1$ мм; ориентации прокатки: 1 – параллельно, 2 – перпендикулярно; 3, 4 – пермаллой, толщина 0,5 мм, $b = 30$ мм, $L = 40$ мм, 3 – $d = 1$ мм; 4 – $d = 2$ мм; 5 – сталь 3415, $b = 40$ мм, $L = 40$ мм, $d = 8$ мм

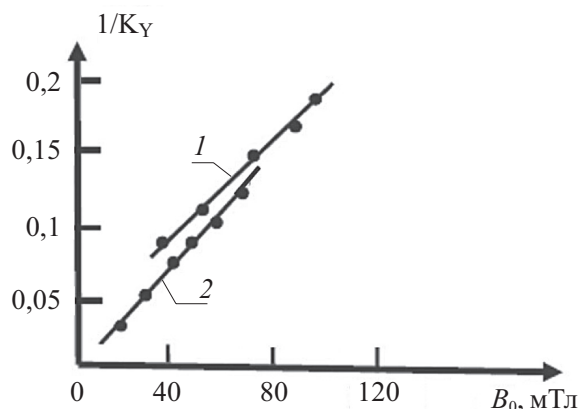


Рис. 4. Зависимости $1/K_Y$ от B_0 для плоского концентратора из стали 3415 толщиной 0,35 мм:
1 – $d = 0,5$ мм, $L = 10$ мм, $b = 40$ мм; 2 – $d = 0,5$ мм, $L = 30$ мм, $b = 40$ мм

ние от 500 до 1500 мм, что обеспечивает минимальное влияние на показания магнитометра ферромагнитных элементов и работающей аппаратуры МКА. Для минимизации габаритных размеров магнитометра предусмотрено транспортное положение, при котором штанга поворачивается на угол 90° . Это позволяет расположить магнитометр вдоль борта МКА с минимальными габаритными размерами.

Плоские концентраторы магнитного потока

В общем случае $K_Y(B)$ является нелинейной функцией внешнего магнитного поля B_0 , что представлено на рис. 3 и 4. Проведенные исследования свидетельствуют, что в области линейной зависимости B от B_0 величина $K_Y(0)$ не обуславливается свойствами материала концентратора, а зависит только от его геометрических размеров и зазора между пластинами. Свойства материала концентратора оказывают заметное влияние в области нелинейности $B(B_0)$, т. е. когда размагничивающий фактор N_p и $1/\mu_{нач}$ оказываются сравнимы ($\mu_{нач}$ – начальная магнитная проницаемость материала концентратора). При этом четко проявляется эффект анизотропии (например, от направления прокатки холоднокатаных сталей), что видно на рис. 3 (кривые 1 и 2).

В области насыщения концентратора $1/K_Y$ линейно зависит от B_0 , что представлено на рис. 4. Следует отметить, что, несмотря на технологичность изготовления и более низкую материалоемкость, концентраторы магнитного потока в плоскостном исполнении имеют коэффициенты усиления магнитного потока ниже по сравнению с объемными осесимметричными при той же длине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника : в 2 т. Принципы функционирования основных изделий микромагнитоэлектроники. М., 2001. Т. 1.
2. Meeker D. Magnetics Finite Element Method (femm). Version 4 [Electronic resource]. Mode of access: <http://femm.foster-miller.net> (date of access: 27.12.2013).
3. Буслов И., Бауткин В., Драпезо А., Ярмолович В. Сенсоры слабых магнитных полей на эффекте Холла // Современная электроника 2011. № 1. С. 2–6.
4. Прокошин В. И., Ярмолович В. А. Концентраторы магнитного потока для элементов Холла и устройств микромагнитоэлектроники // Актуальные проблемы физики твердого тела : сб. докл. Междунар. науч. конф. (Минск, 15–18 окт. 2013 г.) : в 3 т. Минск, 2013. Т. 3. С. 338–340.

Поступила в редакцию 27.03.2014.

Валерий Иванович Прокошин – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела.

Вячеслав Алексеевич Ярмолович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики твердого тела.

Александр Петрович Драпезо – директор ООО «НТЦ “ВИСИТ Группсенсор”».